Struktur und Eigenschaften von im Ultra-Hoch-Vakuum hergestellten Beryllium-Aufdampfschichten

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors
der Naturwissenschaften
der Mathematisch-naturwissenschaftlichen Fakultät
der Eberhard-Karls-Universität zu Tübingen

vorgelegt von

Heinz Köhler

aus Erfurt

1969

Struktur und Eigenschaften von im Ultra-Hoch-Vakuum hergestellten Beryllium-Aufdampfschichten

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors
der Naturwissenschaften
der Mathematisch-naturwissenschaftlichen Fakultät
der Eberhard-Karls-Universität zu Tübingen

vorgelegt von

Heinz Köhler

aus Erfurt

1969

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

Tag der mündlichen Prüfung: 9. Juli 1969

Dekan: Professor Dr. A. Seilacher

1. Berichterstatter: Professor Dr. G. Möllenstedt

2. Berichterstatter: Professor Dr. M. Auwärter

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Einleitung	1
1. Untersuchungsmethoden	2
1.1 Herstellungs- und Meßverfahren	2
1.2 Lichtoptische Messungen	3
1.3 Elektrische Widerstandsmessungen	4
1.4 Elektronenoptische Messungen	5
2. Resultate	7
2.1 Die Wahl der Aufdampfquelle	7
2.2 Aufdampfgeometrie und Filmstruktur	12
2.3 Wahl des Trägers und der Präparationsmethoden von Be-Schichten	14
2.4 Lichtoptische Transmission und Widerstandsverhalten	17
2.5 Elektronen-Streuabsorptionskontrast	20
2.6 Abhängigkeit der lichtoptischen Durchlässigkeit von Be-Aufdampfschichten von der Wellenlänge	23
2.7 Optische Konstanten von Be-Aufdampfschichten	24
3. Diskussion der Resultate und Anwendungen	27
3.1 Das Aufdampfverhalten von Be und die Präparation freitragender Be-Filme	27
3.2 Anmerkung zum lichtoptischen Verhalten von Be-Aufdampfschichten	29
3.3 Anwendungen von freitragenden Be-Filmen	29
Zusammenfassung	32
Literaturverzeichnis	35

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41547611_0070

Einleitung

Das Leichtmetall Beryllium (ϱ = 1,85 g/cm^3) besitzt eine Reihe von besonderen Eigenschaften, die es zu einem wichtigen Werkstoff der modernen Technik erheben. Zu den speziellen Materialeigenschaften zählt seine hohe Durchlässigkeit für Elektronen- und Röntgenstrahlen. In der angewandten Elektronenmikroskopie wurden Beryllium-Folien schon frühzeitig als Objekt-Träger erprobt (1, 2).

Schwierigkeiten in der Präparation freitragender dünner Be-Filme sind die Ursache dafür, daß die Anwendung dieser Filme auf Einzelfälle beschränkt blieb und daß nur geringe Kenntnisse über die Struktur dieser Träger vorliegen. Diese Arbeit soll einen Beitrag zur Struktur von aufgedampften Be-Schichten liefern.

Die Filme wurden durch Aufdampfen im Ultrahochvakuum hergestellt. Die Einflüsse von Aufdampfquelle, Aufdampfgeometrie und Substrat auf die Filmstruktur wurden mit Hilfe von lichtoptischen Transmissionsmessungen, elektrischen Widerstandsmessungen und elektronenoptischen Meßmethoden bestimmt. Als Be-Ausgangsmaterial diente Pechiney CR - Flitter.

Das Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung eines Verfahrens, das die Herstellung freitragender Be-Filme mit geringer Eigenstruktur und großer Durchlässigkeit für Röntgen- und Elektronenstrahlen erlaubt. Ferner sollten die lichtoptischen Eigenschaften von Be-Aufdampfschichten im sichtbaren und im nahen ultraroten Spektralbereich untersucht werden.

1. Untersuchungsmethoden

1.1 Herstellungs- und Meßverfahren

In einer Ultrahochvakuum-Aufdampfapparatur vom Typ BA 350 U wurden im Vakuumbereich von 10^{-9} bis 10^{-8} Torr sowohl mittels konventioneller Verdampfung aus Metallschiffchen als auch mittels Elektronenstrahl-Verdampfung Be-Filme auf verschiedene Substrat-Materialien kondensiert. Um von jedem Aufdampf-Experiment eine Serie von Be-Filmen verschiedener Dicke zu erhalten, wurden mit Hilfe einer Haltevorrichtung 5 Substrate in verschiedenen Entfernungen von der Aufdampfquelle angebracht.

Die Entnahme der Be-Filme aus der UHV-Apparatur, die daran anschließenden Messungen an den Filmen und die Präparation der freitragenden Filme erfolgte unter Einhaltung der Sicherheitsvorkehrungen, die notwendig sind, um das wegen der Toxizität von Be vorhandene Gesundheitsrisiko auf ein Mindestmaß zu beschränken.

Die Messungen der lichtoptischen Transmission, des elektrischen Widerstandes und die interferometrische Bestimmung der Filmdicke wurden unmittelbar nach Fertigstellung einer Aufdampfserie durchgeführt. Obgleich die hierfür notwendige manuelle Film-Behandlungszeit durch eine geeignete Experimentier-Routine minimal gehalten wurde, ist es jedoch nicht möglich, die Oberflächeneigenschaften der unter UHV-Bedingungen hergestellten Be-Filme zu erhalten. Es tritt stets eine geringfügige Oxidation ein. Für die Struktur der Filme spielt sie allerdings keine große Rolle, da freitragende Filme aus Festigkeitsgründen eine Mindestdicke haben müssen, bei der die Filmwachstumsstufe der Koaleszenz (5) bereits beendet ist.

1.2 Lichtoptische Messungen

Zur Bestimmung des lichtoptischen Transmissionsverhaltens der aufgedampften Be-Filme wurden 2 verschiedene Meßmethoden angewandt:

1.) Die Messung der Transmission $T = I/I_o$ der Filme unmittelbar nach dem Aufdampfen: Zur Routine-Bewertung der Aufdampfserien wurden die Kurzschlußströme I_o und I einer Si-Photodiode bei Durchleuchtung des Trägers und des Trägers+Be-Film gemessen. Die Versuchsanordnung ist in Abb. 1 dargestellt. Wegen des linearen Anstieges des Kurzschlußstromes mit der Beleuchtungsstärke der Photodiode ist diese Anordnung für die Messung im Filmdickenbereich von einigen Å bis zu mehr als 2000 Å geeignet.

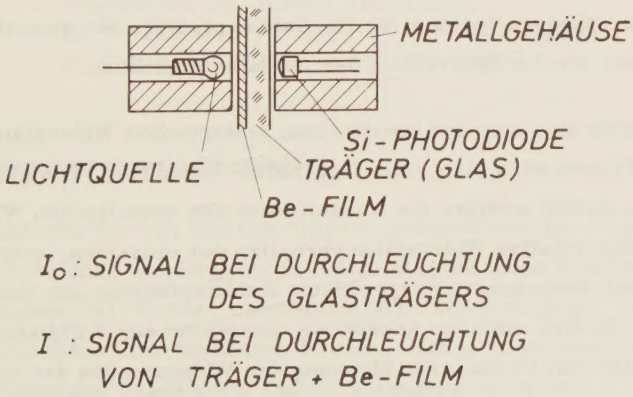


Abb. 1: Meßaufbau für die Bestimmung der lichtoptischen Transmission von Aufdampfschichten mittels Photodiode

2.) Die Messung der Transmission in Abhängigkeit von der Wellenlänge zur Bestimmung der optischen Konstanten von Be-Aufdampfschichten wurde im Bereich von $\lambda = 0,4\,\mu m$ bis $\lambda = 1\,\mu m$ mit einem Zeiß-

Spektralphotometer PMQII und von 1 µm bis 2,5 µm mit einem Beckmann Infrarot Spektrograph BK 2 durchgeführt.

Die Dicken der Be-Aufdampfschichten wurden mit einem Zweistrahlinterferenz-Mikroskop der Fa. Leitz gemessen. Die Dicken von ausgewählten Be-Filmen wurden mit einem Tolansky-Interferenz-Mikroskop der Fa. Johansson, Berlin, gemessen.

1.3 Elektrische Widerstandsmessungen

Das Widerstandsverhalten dünner Aufdampfschichten wird durch den Reinheitsgrad des Ausgangsmaterials und durch die Dicke der Schicht bzw. durch die Filmwachstumsstufe bestimmt. Im Hinblick auf die bereits in der Literatur berichteten Zusammenhänge zwischen Reinheitsgrad und spezifischem Widerstand von Beryllium (6) ist die Messung des Widerstandsverhaltens von Be-Aufdampfserien ein wesentlicher Parameter für die Beurteilung der Aufdampfschichten.

Zur exakten Messung des spezifischen elektrischen Widerstandes von dünnen Filmen wird eine Vier-Elektroden-Anordnung verwandt (7). Da in dieser Arbeit weniger die Absolutwerte des spezifischen Widerstandes als das relative Widerstandsverhalten der einzelnen, unter verschiedenen Bedingungen hergestellten Aufdampfserien von Interesse war, wurde eine einfache Anordnung, bestehend aus 2 Platinelektroden, im Abstand von 15 mm, zur Messung des Widerstandes der Be-Aufdampfschichten gewählt. In Abb. 2 ist der Meßkopf dargestellt. Die Platinelektroden (0,5 mm Drahtdurchmesser) wurden um je einen Trovidurzylinder von 20 mm Durchmesser gewunden. Die Trovidurzylinder sind in einer Schwalbenschwanzführung in senkrechter Richtung beweglich. Zugfedern sorgen für einen konstanten Druck der Pt-Elektroden auf den Be-Film. Der Widerstand der durch den Abstand der Pt-Elektroden markierten Meßstrecke auf dem Be-Film wird mit einer Meßbrücke gemessen.

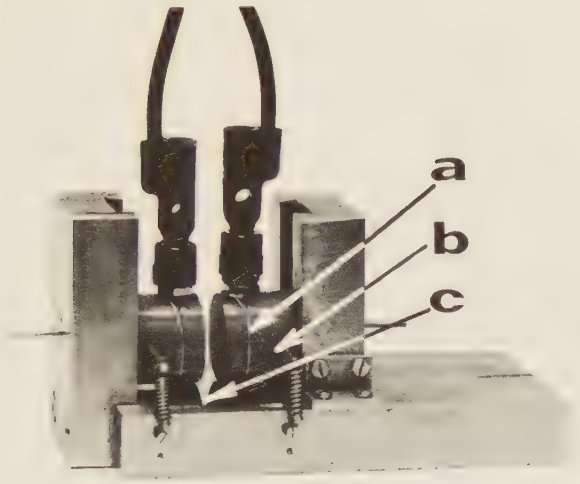


Abb. 2: Meßkopf zur Bestimmung des elektrischen Widerstandes von Be-Aufdampfschichten.
a: Pt-Elektrode b: Trovidur-Zylinder
c: Be-Aufdampfschicht mit Glasträger

1.4 Elektronenoptische Messungen

Die Strukturen der von den Glasträgern präparierten Be-Filme wurden mittels Abbildung und Beugung in einem magnetischen Elektronenmikroskop ausgewertet. Ferner wurden mit Hilfe eines über der Zwischenbildschirmebene einschiebbaren Faraday-Käfigs Elektronen-Streuabsorptions-Messungen ausgeführt. Der Strahlengang ist in Abb. 3 illustriert.

Die Bestrahlungsapertur des Kondensors von etwa 10^{-3} wurde für alle Messungen konstant gehalten. Durch Auswechseln der Objektivaperturblende wurden Messungen des Elektronen-Streuabsorptions-Kontrastes bei verschiedenen Objektivaperturen ermöglicht. Für die Objektivaperturen wurden die aus Brennweite und Radius berechneten Werte benutzt.

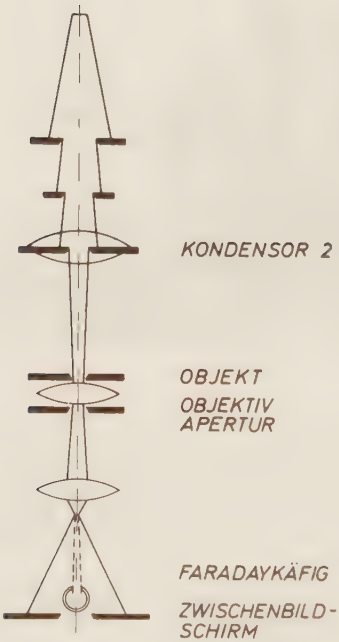


Abb. 3: Anordnung zur Messung des Elektronen-Streuabsorptions-Kontrastes

Die durch den Streuabsorptions-Kontrast bestimmte elektronenmikroskopische Durchlässigkeit wurde nach der Formel

$$D = I(\alpha) / I_o(\alpha)$$ berechnet.

Dabei sind

$I_o(\alpha)$: Elektronenstrom ohne Objekt

$I(\alpha)$: durch Streuabsorption im Objekt reduzierter Elektronenstrom

2. Resultate

2.1 Die Wahl der Aufdampfquelle

Bereits die ersten Experimente bestätigten die in der Literatur berichteten Schwierigkeiten bei der Verdampfung von Be aus Wolfram-Aufdampfschiffchen (8), die im Wesentlichen durch die Bildung von Berylliden erklärt werden können (9, 10). Um die geeignetste Verdampfungsquelle für Be aufzufinden, wurden folgende Verfahren erprobt:

a) Widerstandsbeheizte Verdampfungsquellen

1) Tantal-Schiffchen
2) Wolfram-Schiffchen mit einer im Plasmaspritzverfahren hergestellten Beschichtung aus Zirkonoxyd und Aluminiumoxyd

b) Elektronenstrahl-Verdampfungsquelle

Die Struktur von Aufdampfschichten wird durch die Temperatur und Beschaffenheit der Aufdampfquelle, die Aufdampfgeometrie und die Kondensationseigenschaften des Verdampfungsgutes in Bezug auf das Stubstrat beeinflußt. Um den Einfluß der Aufdampfquelle getrennt zu bestimmen, wurden während einer Versuchsreihe Aufdampfgeometrie und Substrat unverändert gelassen. Als Substrate wurden Glas-Objektträger verwendet.

Abb. 4 zeigt eine Zusammenstellung der lichtoptischen Transmissionen und des Verhaltens des Widerstandes in Abhängigkeit von der Dicke von Be-Filmen, die aus den verschiedenen Quellen gewonnen werden.

Die mit a1, a2 und a3 bezeichneten Meßwerte stammen von Be-Filmen, die aus einem Ta-Schiffchen aufgedampft wurden. Dabei ist a1 der erste und a2 der zweite Aufdampf-Versuch mit demselben Schiffchen. Bei

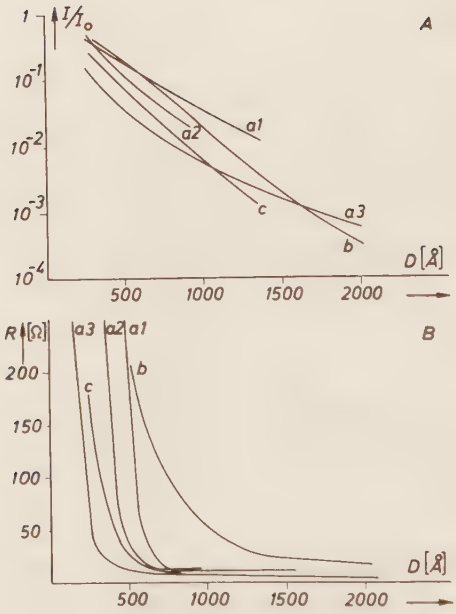


Abb. 4: A Lichtoptische Transmission und
B Elektrischer Widerstand

von Be-Aufdampfschichten, die aus verschiedenen Verdampfungsquellen aufgedampft wurden.

erstmaliger Verwendung eines neuen Ta-Schiffchens werden die größten Durchlässigkeiten und höchsten Widerstände gemessen. Die Werte wurden geringer nach mehrmaliger Verwendung des gleichen Schiffchens. Einigermaßen konstante Resultate erhält man, wenn die Ta-Oberfläche gleichmäßig mit einer Beryllid-Schicht bedeckt ist. Die a3-Werte wur-

den an einer einzigen Aufdampfserie gemessen, die zur Erprobung geeigneter Reinigungsmethoden der Glasträger durchgeführt wurden.

Zur Vermeidung chemischer Reaktionen zwischen dem Aufdampfgut und der Verdampfungsquelle wird die Oberfläche des Schiffchens mit einem inerten Oxyd beschichtet (8, 11). In Abb. 4b sind Meßwerte von Be-Aufdampfschichten aufgetragen, die aus Wolfram-Schiffchen aufgedampft wurden, deren Oberflächen mit einem Gemisch von Zirkonoxyd und Aluminiumoxyd im Plasma-Sprühverfahren beschichtet waren. Die bei der Verdampfung von Be aus diesen Schiffchen beobachteten Vorgänge sind in Tab. 1 zusammengestellt. Im Vergleich zu Be-Aufdampfschichten, die aus anderen Quellen aufgedampft wurden, besitzen die mit den oxydbeschichteten Schiffchen hergestellten Filme ein noch nicht zusammenhängendes Gefüge. Dies geht aus den hohen Lichtdurchlässigkeiten, den großen elektrischen Widerständen und aus dem Verhalten des Widerstandes mit zunehmender Filmdicke hervor.

Be-Aufdampfschichten, die mittels einer Elektronenstrahl-Verdampfungsquelle hergestellt wurden, zeichnen sich durch Reproduzierbarkeit der Lichtdurchlässigkeiten und der Widerstände aus. In Abb. 4c sind die an einer größeren Anzahl von Aufdampfserien gemessenen Werte dargestellt. Die häufig bei Elektronenstrahlverdampfung berichteten (12) "Aufladungs-Figuren" wurden nicht beobachtet.

Die Erfahrungen bei Verwendung der verschiedenen Aufdampfquellen zur Herstellung von Be-Filmen sind in Tab. 1 zusammengestellt.

Verdampfungs-quelle	Erfahrungen
Tantal-Schiffchen	Verdampft man Be aus metallischen Aufdampfschiffchen, so findet insbesondere für Ta bei einer Temperatur von ca 1150°C eine Benetzung des Schiffchens mit Be bzw. Ta-Beryllid statt. Bei dieser Temperatur beträgt die Aufdampfrate etwa 150 Å/sec. Wird das Schiffchen plötzlich auf eine Temperatur von etwa 1283°C (Schmelztemperatur von Be) gebracht, so findet eine explosive Verdampfung von Be statt, wobei das Verdampfungsgut aus dem Schiffchen herausspritzt.
Wolfram-Schiffchen mit Oxyd-Beschichtung	Während des Verdampfungsvorganges werden folgende separate Phasen beobachtet: 1) Sintern des Be-Pulvers 2) Schmelzen des gesinterten Pulvers zu einer Halbkugel, bei der interessanterweise die ebene Fläche nach oben zeigt. Die Temperatur kann dabei bis zu 2000°C betragen. 3) Bei weiterer Temperaturerhöhung wird die Halbkugel auf der Unterlage beweglich. Es kommt dabei vor, daß das Material zu einer Kugel zusammenschmilzt. Nach langsamer Abkühlung ergibt sich eine aus nur wenigen Kristallen bestehende Struktur.
Elektronenstrahl-Verdampfungsquelle	Für die bei unseren Versuchen verwendete kommerzielle Elektronenstrahl-Verdampfungseinrichtung existiert eine kritische Einstellung von Strom und Spannung, wobei unterhalb eines bestimmten Wertes keine nennenswerte Verdampfung von Be zu beobachten ist, während oberhalb dieses Wertes durch Spritzen des Verdampfungsgutes eine ungleichmäßige Verdampfung stattfindet.

Tab. 1: Erfahrungen bei Verwendung verschiedener Aufdampfquellen zur Herstellung von Be-Aufdampfschichten

Es gelang nur in wenigen Fällen, die in der Versuchsserie zur Bestimmung der geeignetsten Aufdampfquelle hergestellten Aufdampfschichten als freitragende Filme zu präparieren, da hier keine zusätzlichen Trennschichten auf den Glasträgern verwendet wurden, die das Abflottieren der Be-Aufdampfschichten ermöglichten. Die Haftung der Schichten auf den Glasträgern erschwerte deren weitere Präparation. Darum wurde keine systematische Gegenüberstellung von elektronenmikroskopischen

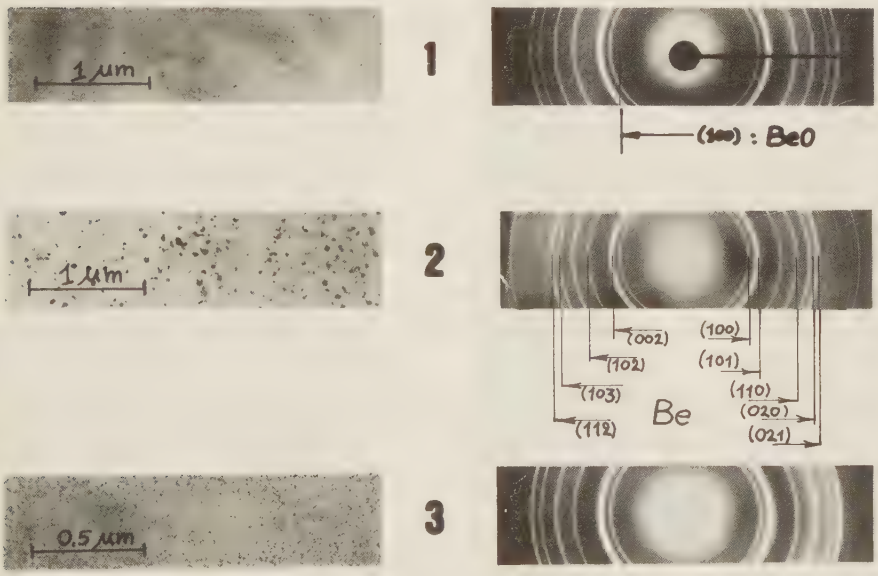


Abb. 5: Elektronenmikroskopische Abbildungen und Beugungsdiagramme von Be-Filmen, die aus verschiedenen Verdampfungsquellen aufgedampft wurden.

Nr.	1	2	3
Verdampfungsquelle	Tantal	Wolfram, oxydbeschichtet	Elektronenstrahl-Verdampfer
Schichtdicke	300 Å	3000 Å	550 Å

Abbildungen der mit den verschiedenen Verdampfungsquellen hergestellten Be-Filme vorgenommen. Jedoch ist bereits aus den vorhandenen Ergebnissen ersichtlich, daß die in 2.3 beschriebene Proportionalität zwischen Korngröße und Filmdicke für alle Verdampfungsarten zutrifft. Die in Abb. 5 gezeigten elektronenmikroskopischen Abbildungen und Beugungsdiagramme zeigen die Körnigkeit der aus den verschiedenen Quellen aufgedampften Be-Filme. Die Beugungsdiagramme zeigen, daß bei allen hergestellten Filmen der BeO Gehalt gering ist.

2.2 Aufdampfgeometrie und Filmstruktur

Die Aufdampfgeometrie, d.h. die Größe der Verdampfungsquelle und deren Entfernung vom Filmträger, und die Orientierung des Substrates in Bezug auf die Verdampfungsquelle sind für die Dickenverteilung und Struktur einer Aufdampfschicht entscheidend (13). Die für die Dickenverteilung beobachteten Gesetzmäßigkeiten sind in der Literatur ausführlich behandelt (14). Hier soll über eine von der Einfallsrichtung des Dampfstrahles abhängige Film-Faser-Textur (15) berichtet werden.

In Abb. 6 sind elektronenmikroskopische Strukturen einer Be-Aufdampfserie mit verschiedenen Winkeln der Filmträger-Oberfläche gegen lie Aufdampfrichtung zusammengestellt. Die Interpretation der in Abb. 6 B, 6 C und 6 D gezeigten Texturen setzt die Kenntnis der azimutalen Verteilung der Ringintensitäten der Beugungsdiagramme voraus (16, S. 130). Im vorliegenden Fall wird eine qualitative Deutung gegeben, die zur Demonstration des hier diskutierten besonderen Verhaltens von Be-Aufdampfschichten ausreicht.

Aus den Beugungsdiagrammen und Abbildungen der Abb. 6 geht hervor, daß mit abnehmendem Einfallswinkel des Dampfstrahls eine zunehmende Orientierung der Be-Aufdampfschichten vorhanden ist. Diese Orien-

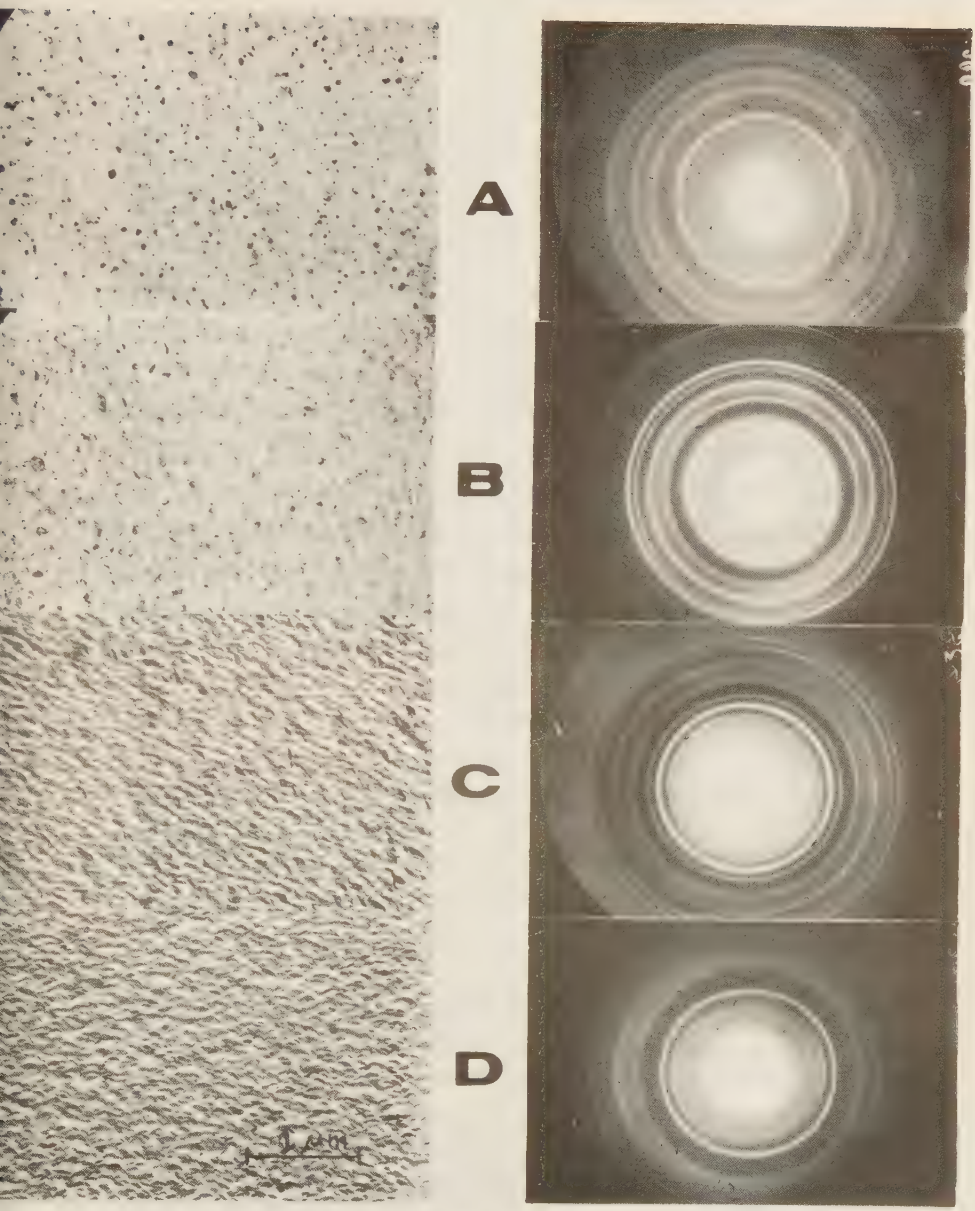


Abb. 6: Faser Textur an Beryllium-Aufdampfschichten

Filmbezeichnung	A	B	C	D
Einfallswinkel des Dampfstrahls	90°	75°	45°	25°
Schichtdicke Å	1400	5000	4000	1400

tierung oder Textur äußert sich darin, daß einige Beugungsringe nur noch in Segmenten vorhanden sind, wobei die Segment-Länge mit zunehmender Orientierung abnimmt. Der Winkelbereich der Segmente in einem Beugungsring mit den Indizes (hkl) entspricht der Winkelverteilung der orientierten Kristallite um die Richtung [hkl] (17, S. 185). Die Beugungsbilder in Abb. 6 C und 6 D zeigen, daß bei Abnahme des Dampfstrahl-Einfallswinkels von 45° auf 25° die Orientierung der (100) und der (002) Ebenen deutlich zunimmt, während die (101) Ebenen keine Orientierung besitzen. Damit lassen sich die in Abb. 6 abgebildeten Strukturen wie folgt erklären: Bei der Kondensation der Be-Kristallite auf dem Träger werden diese in Einfallsrichtung des Dampfstrahles zusammengeschoben, wobei die Basal-Flächen gegen die Träger-Oberfläche geneigt sind. Diese Neigung wächst mit Abnahme des Dampfstrahl-Einfallswinkels. Es scheint, als ob die Basalflächen die Tendenz haben, sich senkrecht zum Dampfstrahl einzustellen.

2.3 Wahl des Trägers und der Präparationsmethoden von Be-Schichten

Die Auswahl des Trägers für das Aufdampfen von Be-Schichten im UHV und für die Präparation dieser Schichten als freitragende Filme gelten folgende Gesichtspunkte:

a) Der Träger darf unter UHV-Bedingungen weder gasen noch dürfen sich seine Eigenschaften während des Ausheizens des UHV-Systems verändern.

b) Auf der Trägeroberfläche muß eine homogene, über die gesamte Fläche gleichmäßige Kondensation des Berylliums erfolgen.

c) Zur Präparation der Schichten als freitragende Filme müssen die kondensierten Schichten vom Träger ablösbar sein. Dabei soll möglichst keine Veränderung des Filmes eintreten.

In Versuchsreihen mit verschiedenen Trägern und variierten Präparationsmethoden wurden die geeigneten Parameter für die Herstellung freitragender Be-Filme bestimmt. In Tab. 2 sind die bisher bekannten Methoden zur Herstellung solcher Filme und die im Tübinger Laboratorium gemachten Erfahrungen zusammengestellt.

Zur Routine-Herstellung freitragender Be-Filme wurde das von Fukami und Tani (19) in anderem Zusammenhang erwähnte, von Jönsson, Hoffmann und Möllenstedt (4) für die Herstellung von Be-Filmen erprobte Präparationsverfahren unter Zuhilfenahme einer auf den Träger aufgedampften Boroxyd-Trennschicht angewandt. Auf einen Glasträger wird ein etwa 200 Å dicker B_2O_3-Film aufgedampft und darauf ohne Brechen des Vakuums gleich die Be-Schicht kondensiert. Der in Bereiche gewünschter Größe angeritzte Film läßt sich in einem Wasserbad ohne Schwierigkeiten abflottieren.

Obgleich das geschilderte Verfahren mit gutem Erfolg angewandt wurde, ergeben sich besonders bei der Präparation großflächiger (0,5 bis etwa 20 mm^2) Filme folgende Schwierigkeiten, die u.U. eine hohe Ausschußquote zur Folge haben:

1) Während des Aufdampfens werden in den kondensierenden Schichten mechanische Spannungen erzeugt. Als Folge dieser Spannungen kräuseln sich die Filme beim Abflottieren. Oft reißen diese Filme während des Trocknens.

2) Nachdem die Be-Filme vom Glasträger abflottiert sind, müssen sie von der Wasseroberfläche aufgefangen werden. Wegen der großen Oberflächenspannung des Wassers besteht die Tendenz, daß sie entweder beim Abheben aus dem Wasserbad oder beim Trocknen reißen.

Präparationsmethoden	Erfahrungen und Anmerkungen
Nach V. E. Cosslett (1): 1) Aufdampfen von Be auf einen organischen Lackfilm 2) Ablösen von Lack + Be von der Lackfilmunterlage 3) Nach Zerteilung in Stücke gewünschter Größe erfolgt die Lackauflösung in einem Lösungsmittel	Die geringe Temperaturbeständigkeit der verwendbaren Lacke erschwert die Anwendung dieser Methode unter UHV.
Nach N. Hast (2) 1) Aufdampfen von Be auf eine Flüssigkeitsoberfläche (Glyzerin) 2) Abflottieren und Zerteilen des Filmes	Eigene Versuche mit mehrfach destilliertem Glyzerin haben gezeigt, daß dieses Material weder für Hochvakuum noch für UHV geeignet ist. Andere Flüssigkeiten werden gegenwärtig noch in Betracht gezogen, da nicht auszuschließen ist, daß die Kondensation auf einer Flüssigkeit sehr feinkörnige Schichten ergeben kann.
Nach Jönsson, Hoffmann und Möllenstedt (4): 1) Kondensieren des Be auf einen mit Boroxyd beschichteten Glasträger 2) Abflottieren von Filmen geeigneter Größe durch Auflösen des Boroxyds in Wasser	Diese Methode wurde in dieser Arbeit für die Routine-Herstellung von Be-Filmen angewandt. Die Beschreibung erfolgt im Text.
Nach Keller (18): 1) Aufdampfen von Be auf einen Kohlefilm geringer Dicke 2) Präparation von Filmen geeigneter Größe unter Beibehaltung des Kohlefilms	Dünne Be-Aufdampfschichten kondensieren z. T. nur ungleichmäßig auf einer Kohleoberfläche. Diese Methode eignet sich aber zur Herstellung von Filmen, deren Dicke > 200 Å ist.
Verwendung von Kristall-Spaltflächen: 1) Aufdampfen von Be auf NaCl-Spaltflächen 2) Abflottieren des Be-Filmes in Wasser (evtl. mit einem Lackfilm zur Verstärkung).	Be hat selektive Kondensationseigenschaften. Auf NaCl-Spaltflächen kondensiert es schlecht. Das zeigen die unten aufgeführten verschiedenen Niederschlagsdicken bei gleichen UHV- und Aufdampfbedingungen:

Träger:	NaCl-Spaltfl. vak.-gelagert (ca 1 Tag)	NaCl-Spaltfl. frisch	Glasträger hochgereinigt
Schicht-Dicke:	50 Å	300 Å	800 Å

Tab. 2: Methoden zur Herstellung freitragender Be-Filme, Erfahrungen und Anmerkungen zur Anwendung im Ultra-Hoch-Vakuum

2.4 Lichtoptische Transmission und Widerstandsverhalten

In Abb. 7 sind die lichtoptischen Transmissionen und das Widerstandsverhalten zweier Be-Aufdampfserien in Abhängigkeit von der Dicke aufgetragen, die nach dem in 2.3 beschriebenen Verfahren durch Verdampfung aus einem Tantal-Schiffchen hergestellt wurden. Die aufgetragenen Werte sind repräsentativ für eine größere Anzahl von Experimenten. Elektronenmikroskopische Abbildungen von 4 Be-Filmen aus einer dieser Aufdampfserien zeigen die Abb. 8. Die Proportionalität zwischen Korngröße und Filmdicke entspricht den Erwartungen (20). Einen Vergleich der Korngrößen zweier Be-Filme unterschiedlicher Dicken zeigt Abb. 9 bei verschiedenen Vergrößerungen.

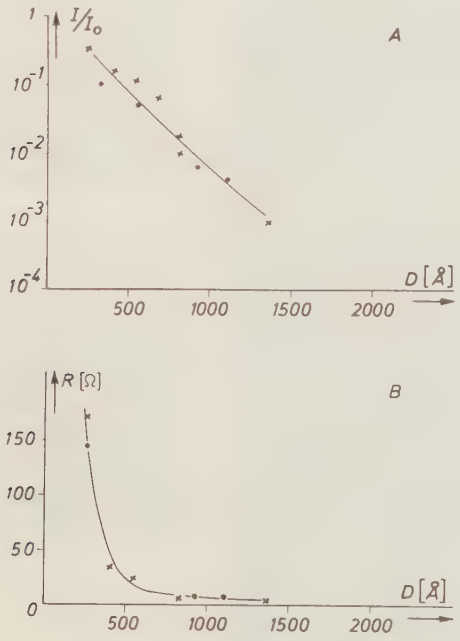


Abb. 7: Lichtoptische Transmission (A) und elektrischer Widerstand (B) in Abhängigkeit von der Dicke von Be-Folien, die aus Tantal-Schiffchen aufgedampft und mit Hilfe des Boroxyd-Präparationsverfahrens freitragend hergestellt wurden.

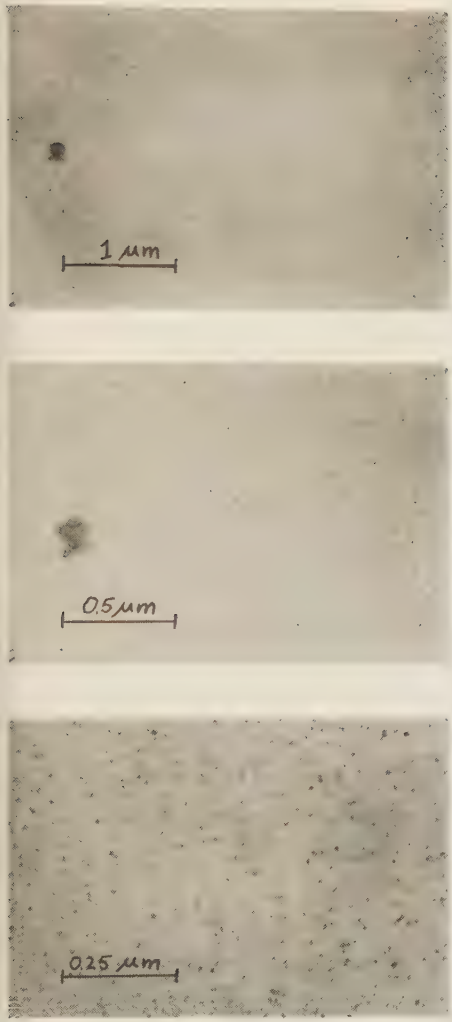
D = 1950 Å

D = 1100 Å

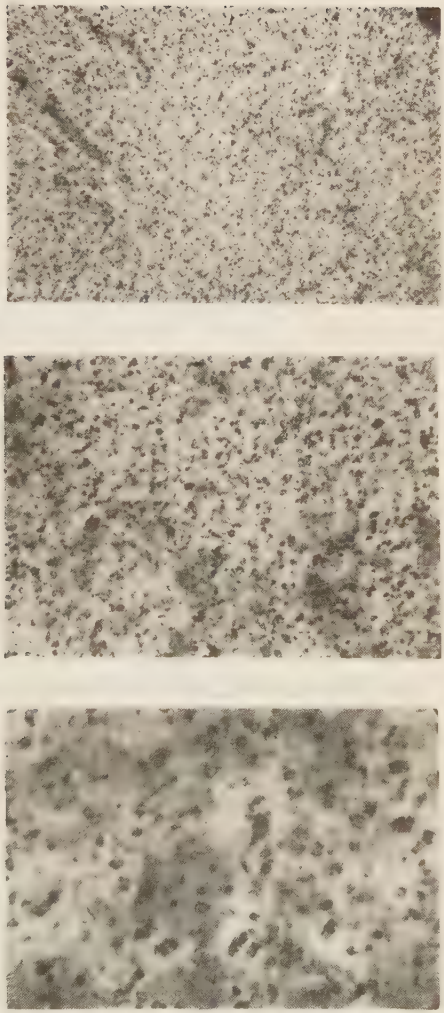
D = 700 Å

D = 300 Å

Abb. 8: Elektronenmikroskopische Abbildungen der in Abb. 7 benutzten Be-Filme



D = 300 Å



D = 1950 Å

Abb. 9: Korngrößenvergleich von 2 Be-Filmen mit den Dicken 300 Å und 1950 Å von den in Abb. 7 ausgemessenen Folien bei verschiedenen elektronenmikroskopischen Vergrößerungen

2.5 Elektronen-Streuabsorptionskontrast

Mit der in 1.4 beschriebenen Anordnung wurde die elektronenmikroskopische Durchlässigkeit der nach 2.3 hergestellten Be-Filme für 60 keV Elektronen für verschiedene Objektivaperturen gemessen.

Wie in der Literatur (16, 21) üblich, soll im folgenden die Kontrast-Definition

$$K = \log I_o/I = c(\alpha, U_o, Z)\ \varsigma \cdot D$$

verwendet werden. Dabei sind

$c(\alpha, U_o, Z) = (\log e)/x_k$

α = Objektiv-Apertur

U_o = Beschleunigungsspannung

Z = Kernladungszahl

x_k = Kontrastdicke des Objektes (16, S. 161)

$\varsigma \cdot D$ = Massendicke des Objektes

Die gemessenen Durchlässigkeiten und die daraus berechneten Kontraste der in Abb. 8 abgebildeten Be-Filme sind in Abb. 10 und 11 dargestellt. Insgesamt wurden bei der Auswertung der Durchlässigkeitsmessungen von weiteren 10 Aufdampfserien keine wesentlichen Abweichungen von den in Abb. 10 und 11 dargestellten Werten gefunden.

Aus den in Abb. 11 aufgetragenen Kontrastwerten wurden die in Tab. 3 zusammengestellten Werte für $c(\alpha, U_o, Z)$ berechnet. Den Berechnungen wurde die von C. Hall (24, 17) durch Wägung von Be-Aufdampfschichten bestimmte Dichte $\varsigma = 1{,}73\ g/cm^3$ zugrunde gelegt. Da mit abnehmender Dicke die Dichte von Aufdampfschichten z. T. erheblich abnimmt (22), ist dieser Wert für Filmdicken kleiner als 700 Å wahrscheinlich etwas zu groß.

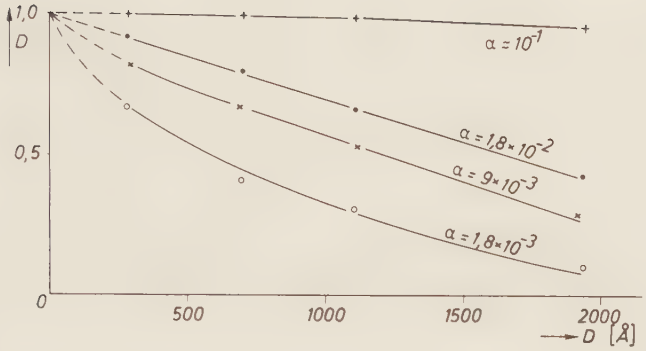


Abb. 10: Elektronenmikroskopische Durchlässigkeiten der in Abb. 8 gezeigten Be-Filme in Abhängigkeit von verschiedenen Objektivaperturen

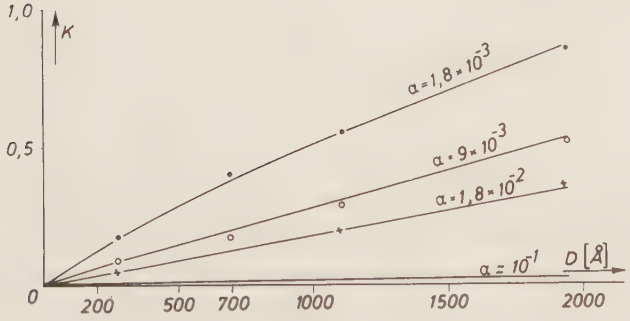


Abb. 11: Der Kontrast K, aus den in Abb. 10 wiedergegebenen Elektronendurchlässigkeiten berechnet

D (Å)	1100	1100	700
K	0, 18	0, 3	0, 39
α	0, 018	0, 009	0, 0018
$c = K/\varrho \cdot D$ ($cm^2/\mu g$)	0, 0095	0, 016	0, 0325

Tab. 3: Werte für $c(\alpha, U_o, Z)$, berechnet aus den in Abb. 10 dargestellten Meßwerten

In Tab. 4 sind die von anderen Autoren an Be-Aufdampfschichten gemessenen Werte für c zusammengestellt. Die Übereinstimmung dieser Werte mit denen in Tab. 3 ist befriedigend.

α = 0, 02 0, 01 0, 004 c = 0, 012 0, 019 0, 027 U_o = 60 kV	Meßwerte von Reimer (16)
für α = 0, 005 und U_o = 75 kV folgt c = 0, 028 $cm^2/\mu g$	Aus der Theorie von Lenz (23) berechnete Werte (16)
für α = 0, 005 und U_o = 65 kV folgt c = 0, 013 $cm^2/\mu g$	Meßwerte von C. Hall (24)

Tab. 4: Literaturwerte für $c(\alpha, U_o, Z)$ von Beryllium-Filmen

Im Zusammenhang mit der Zielsetzung dieser Arbeit ist die elektronenmikroskopische Durchlässigkeit von freitragenden Be-Filmen von wesentlichem Interesse. Zur Beurteilung der "Qualität" der nach 2. 3 hergestellten Filme ist es daher zweckmäßig, die gemessenen Durchlässigkeiten mit denen von Filmen anderer Materialien zu vergleichen. In Abb. 12 ist der Vergleich durchgeführt.

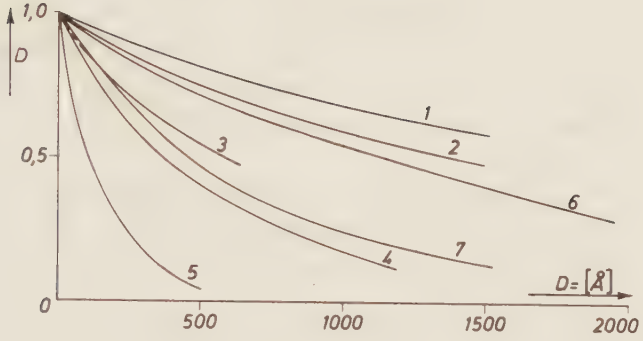


Abb. 12: Dicken-Abhängigkeiten der elektronenmikroskopischen Durchlässigkeiten von dünnen Filmen aus verschiedenen Substanzen

Nr.	Substanz	Apertur Objektiv	Apertur Kondensor	U	Verfasser
1	Movital	0,0045	0,0025	60 kV	(25)
2	Formvar	0,0045	0,0025	60 "	(25)
3	SiO	0,0045	0,0025	60 "	(25)
4	Al	0,018	?	60 "	(26)
5	Ni	0,018	?	60 "	(26)
6	Be	0,009	0,0015	60 "	eigene Arbeit
7	C	0,007	0,002	60 "	(27)

2.6 Abhängigkeit der lichtoptischen Durchlässigkeit von Be-Aufdampfschichten von der Wellenlänge

Die nach 1.2 mit dem Zeiß-Spektralphotometer gemessene spektrale Abhängigkeit der lichtoptischen Transmission von Be-Aufdampfschich-

ten zeigt die Abb. 13. Die stetige Zunahme der Transmission im Wellenlängenbereich von 0,4 µm bis 1 µm war der Anlaß, daß Transmissionen bis in den Infrarot-Bereich zu messen. Die Transmissionen bis zu 2,5 µm wurden mit einem Beckmann Spektrograph bestimmt. Die Abb. 14 demonstriert die Transmissionen von 2 Be-Filmen verschiedener Dicken im Wellenlängenbereich von 0,4 µm bis etwa 2,3 µm.

Ein interessantes Ergebnis der Transmissionsmessungen ist die Beobachtung, daß alle Be-Aufdampfschichten ein Maximum der Transmission bei einer Wellenlänge von ca 1,1 µm haben. Vergleicht man die Transmissions-Unterschiede bezüglich der Lage des Maximums und der Steilheiten auf beiden Seiten des Maximums von Be-Filmen gleicher Dicke, so werden geringe Differenzen beobachtet, die vermutlich ihre Ursache in unterschiedlichen Korngrößenverteilungen in den Filmen haben.

2.7 Optische Konstanten von Be-Aufdampfschichten

Die Messungen der spektralen Verteilung der Transmission wurden zur Bestimmung der optischen Konstanten der Be-Aufdampfschichten verwandt. Die Optischen Konstanten wurden nach einem von H. Wolter (28) angegebenen Verfahren aus folgenden Gleichungen berechnet:

$$I = I_o \, e^{-4\pi kD/\lambda}$$

$$I/I_o = \frac{4 n_o n_s}{(n_o + n_2 + 4\pi k D n_s/\lambda) + 1/4 (n_s^2 - k^2 - n_o^2)(n_s^2 - k^2 - n_2^2)(4\pi D/\lambda)}$$

Hierin bedeuten:

n = Brechungsindex
k = Extinktionskoeffizient
D = Schichtdicke
λ = Wellenlänge

Indizes:

$_o$ = Luft
$_2$ = Träger (Glas)
$_s$ = Be-Aufdampfschicht

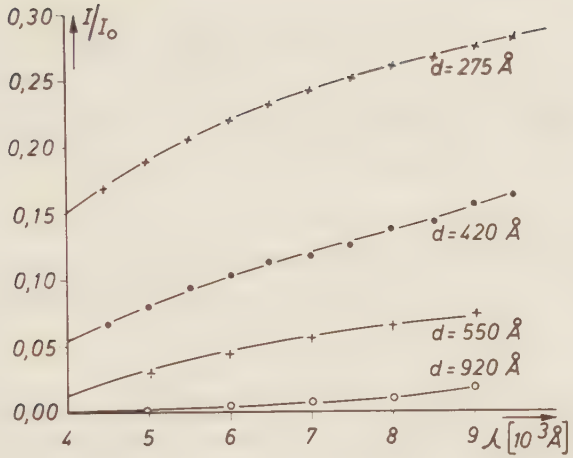


Abb. 13: Lichtoptische Transmission von Be-Folien verschiedener Dicke D in Abhängigkeit von der Wellenlänge

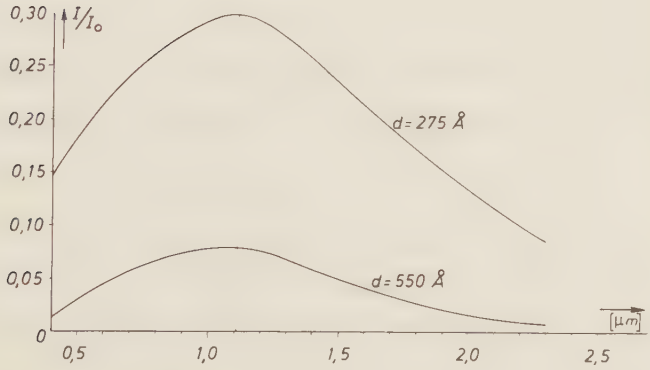


Abb. 14: Transmission von 2 Be-Filmen verschiedener Dicke im Wellenlängenbereich von 0,4 µm bis 2,3 µm

Mit den in Abb. 13 und 14 enthaltenen Werten wurden n_s und k für zwei Be-Filme unterschiedlicher Dicke bei den Wellenlängen $\lambda = 5800$ Å und $\lambda = 8000$ Å berechnet. Die Ergebnisse sind in Tab. 5 den von Be-Aufdampfschichten bekannten Literaturwerten gegenübergestellt.

(Å)	Filmdicke (Å)	I/I_o	n_s	k	Verfasser
5800	275	0,21	1,65	2,62	Ergebnisse dieser Arbeit
5800	550	0,041	2,40	2,72	
8000	275	0,26	1,70	3,12	
8000	550	0,065	2,42	3,21	
5780	lichtundurchlässig		2,64	2,27	H.M. O'Bryan (29)
8000	lichtundurchlässig		2,70	2,80	I.N. Shklyarevkii und R.G. Yarovaya (30)

Tab. 5: Nach H. Wolter (28) berechnete Werte für n_s und k von Be-Aufdampfschichten und Vergleich dieser Werte mit Literaturangaben

Zur Abschätzung des Fehlers, der durch die Ungenauigkeit der Dickenbestimmung des benutzten Tolansky-Interferenzverfahrens entsteht, wurden für D = 275 Å und $\lambda = 5800$ Å die Werte für n_s und k unter der Annahme von einem Dickenmeßfehler von ± 25 Å durchgerechnet. Es ergaben sich $n_s = 1,65 \pm 0,07$ und $k = 2,62 \pm 0,18$.

3. Diskussion der Resultate und Anwendungen

3.1 Das Aufdampfverhalten von Be und die Präparation freitragender Be-Filme

Die Struktur von Be-Aufdampfschichten wird durch die Verdampfungsrate aus der Verdampfungsquelle, durch die Kondensationseigenschaften auf der gewählten Trägersubstanz und durch die Aufdampfgeometrie beeinflußt.

Verschiedene widerstandsbeheizte Aufdampfquellen erzielen unterschiedliche Verdampfungsraten. Dieser Befund hat seine Ursache in der verschiedenen Oberflächenspannung und chemischen Affinität von Be gegenüber dem Material aus dem die Oberfläche der Verdampfungsquelle besteht. Die Eigenschaften der mit verschiedenen Aufdampfquellen hergestellten Be-Aufdampfschichten bei konstanter Anordnung und gleichbleibendem Trägermaterial lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1) Die lichtoptische Transmission der mit gleicher Quelle hergestellten Filme zeigt eine monotone Abnahme mit der Dicke.

2) Der Gang des elektrischen Widerstandes in Abhängigkeit von der Dicke gibt Hinweise auf die Filmwachstumsstadien. Für dicke Schichten wird ein dickenunabhängiger konstanter Widerstand gemessen. Von einer bestimmten Filmdicke ab werden mit abnehmender Dicke die Widerstände zunehmend größer. Dabei wird beobachtet, daß Aufdampfschichten, die mit kleiner Aufdampfrate hergestellt wurden, erst bei etwa 1500 Å Dicke einen konstanten elektrischen Widerstand besitzen (Abb. 4b), während Schichten die mit großer Aufdampfrate erzeugt wurden bereits zwischen 500 Å und 700 Å konstante Widerstände haben.

3) Die Dickenabhängigkeit des elektrischen Widerstandes der auf B_2O_3 aufgedampften Be-Filme zeigt (Abb. 7 B), daß sich der Schichtaufbau auf dieser Oberfläche nicht von Be-Aufdampfschichten, die auf Glasoberflächen kondensierten, unterscheidet. Bei der Präparation des von der B_2O_3 -Trennschicht abgelösten Filmes zeigte sich, daß dessen mechanische Widerstandsfähigkeit gegen Beschädigungen durch die notwendigen Manipulationen geringer ist, als die anderer Metall-Aufdampfschichten gleicher Dicke. So können z. B. Ag-Filme mit 300 Å Dicke freitragend auf 0, 7 mm Bohrungen gespannt werden. Be-Filme der gleichen Dicke können nur mit Schwierigkeiten über Bohrungen mit 0, 3 mm Durchmesser gespannt werden. Dies erklärt sich daraus, daß bei Be-Aufdampfschichten von 300 Å Dicke die Schicht noch nicht homogen ist. Im Gegensatz zu Be zeigt z. B. das Widerstandsverhalten von Ag-Aufdampfschichten, daß hier bereits bei 300 Å Dicke der Schichtaufbau vollendet ist (7).

Die bei Verwendung konventioneller Verdampfungsquellen gemachten Erfahrungen gelten auch für die Verdampfung von Be aus Elektronenstrahl-Verdampfungsquellen.

Durch Schrägstellung der Substratfläche zum Aufdampfstrahl kann in der Be-Aufdampfschicht eine Faser-Textur erzeugt werden. Bei der üblichen Anordnung - Träger Oberfläche senkrecht zur Aufdampfrichtung - wird keine Textur beobachtet.

Versuche mit verschiedenen Trägersubstanzen, die sich zur Präparation freitragender Be-Filme eigneten, ergaben erhebliche Unterschiede in den Kondensationseigenschaften von Be. Es wird sich lohnen, die gefundene selektive Kondensation von Be in späteren Experimenten zu untersuchen, da praktische Anwendungen wahrscheinlich sind.

3.2 Anmerkung zum lichtoptischen Verhalten von Be-Aufdampfschichten

Die Lichtdurchlässigkeit von Be-Aufdampfschichten hat ein Maximum bei einer Wellenlänge von etwa 1,1 µm, entsprechend der Photonenenergie von etwa 1,1 eV. Es ist von Interesse, daß vor kurzem E. Rösch (31) bei der Messung von Energieverlusten schneller Elektronen in Be-Aufdampfschichten einen bisher nicht aufgefundenen diskreten Energieverlust von etwa 1 eV feststellte.

Die optischen Konstanten von dünnen Be-Aufdampfschichten wurden aus den Messungen der lichtoptischen Durchlässigkeit bei verschiedenen Schichtdicken bestimmt. Die zum Vergleich zitierten Literaturwerte der optischen Konstanten wurden aus polarisationsoptischen Messungen an dicken lichtundurchlässigen Be-Schichten gewonnen. Aufgrund der verschiedenen Meßmethoden, der Unterschiede im Herstellungsverfahren der Be-Aufdampfschichten und der unterschiedlichen Schichtdicken dürfen diese Literaturwerte nur z. T. mit den in dieser Arbeit bestimmten Werten verglichen werden. Die ausführliche Bestimmung der optischen Konstanten von Be-Aufdampfschichten und die vergleichende Bewertung der verschiedenen Meßmethoden muß zukünftigen Experimenten vorbehalten bleiben.

3.3 Anwendungen von freitragenden Be-Filmen

Freitragende Be-Filme haben, wie aus Abb. 12 hervorgeht, verglichen mit anderen Metallfilmen die größte Elektronen-Durchlässigkeit. Dieser Befund hat bei früheren Anwendungen in der Elektronenmikroskopie dazu geführt, daß Be-Trägerfilme mit dem Prädikat "fast strukturlos" versehen wurden. Hast (2) berichtet, daß 20 Å dicke Be-Aufdampfschichten über Öffnungen von 0,1 mm Durchmesser freitragend aufgespannt werden können und daß diese Filme bei Betrachtung im Elektro-

nenmikroskop "fast unsichtbar" seien. Nach unseren Erfahrungen muß jedoch bezweifelt werden, daß Be-Aufdampfschichten von 20 Å Dicke bereits zusammenhalten. Elektronenmikroskopische Abbildungen mit modernen Elektronenmikroskopen zeigen selbst bei den dünnsten von uns hergestellten Be-Folien stets kontrastreiche kristalline Kornstruktur.

Versuche mit Be-Filmen im langwelligen Röntgengebiet ergaben, daß der lineare Absorptionskoeffizient der Be-Filme bei einer Wellenlänge von 44,8 Å etwa $2 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-1}$ beträgt. Dieser Wert steht in guter Übereinstimmung mit dem errechneten Koeffizienten von $1,8 \cdot 10^4 \text{cm}^{-1}$. Im Vergleich hierzu beträgt bei der gleichen Wellenlänge der für Al gemessene lineare Absorptionskoeffizient $9,4 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-1}$ (32).

Eine weitere Anwendung fanden unsere freitragenden Be-Filme als Registrierfolien in einem Elektronen-Mikroschreiber (33). Mit dem von

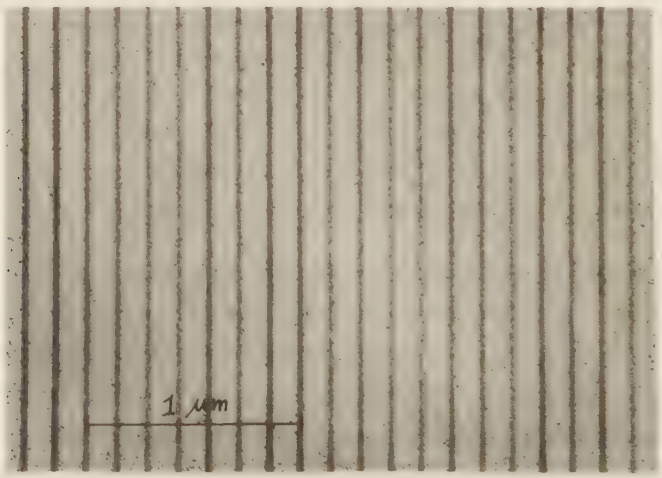


Abb. 15: Be als Registrierfolie für den Elektronen-Mikroschreiber. Elektronenmikroskopische Abbildung eines Strichgitters aus Kohlenwasserstoff-Polymerisat auf einem 400 Å dicken Be-Film.

Holl (34) stabilisierten Strahlerzeugungssystem wurde das in Abb. 15 gezeigte Mikro-Strichgitter auf einen 400 Å dicken Be-Film geschrieben. Die Gitterstriche entstehen durch Polymerisate, die mit Hilfe des Elektronen-Schreibstrahles auf dem Be-Film kondensieren. Bei diesen Versuchen wurden in einzelnen Fällen die durch Elektronenbestrahlung in Anwensenheit von Kohlenwasserstoffen verursachten (35) Filmstrukturumwandlungen in Be_2C beobachtet.

Zusammenfassung

Die beschriebenen Untersuchungen an dünnen aufgedampften freitragenden Berylliumfolien stellen einen Teil der Forschungsergebnisse dar, die an dem für die Weltraumkunde so interessanten Leichtmetall Beryllium in einem wegen der hohen Be-Toxizität streng von den anderen Versuchsräumen isolierten Spezial-Laboratorium gewonnen wurden.

Die zur Herstellung der Folien benutzte UHV-Aufdampfapparatur vom Typ Ba 350 U erzielte während des Verdampfungsvorganges ein Vakuum von 10^{-8} bis 10^{-9} Torr. Als Verdampfungsquellen dienten sowohl stromgeheizte Schiffchen aus Wolfram und Tantal mit und ohne Zirkon-Aluminiumoxid-Gemisch beschichteten Oberflächen als auch moderne Elektronenstrahl-Verdampfungsanlagen.

Als Auffang-Oberfläche für das sich aus der Dampfphase niederschlagende Beryllium wurden geprüft: Mehrmals destilliertes Glycerin nach N. Hast, organische Substanzen der verschiedensten Art, mit Boroxid beschichtete Glasträger und Kristall-Spaltflächen von NaCl.

Der Einfluß der verschiedenen Quellen und des Materials des Substrates auf die Eigenschaften des Be-Niederschlages ist vielgestaltig. Die Erfahrungen und Beobachtungen sind in Tabellen zusammengefaßt. Reproduzierbare Ergebnisse erzielte man mit einem Ta-Schiffchen, dessen Oberfläche mit einer dünnen Schicht beryllid versehen war und wenn man als Substrat eine mit Boroxid beschichtete Glasoberfläche benutzte, von der sich der Niederschlag am geschicktesten in Wasser abflottieren ließ.

Aus Elektronenbeugungs-Aufnahmen an so gewonnenen freitragenden Be-Folien läßt sich entnehmen, daß die anfänglich befürchtete starke Be-Oxidbildung selbst nach Einlaß von Luft in die Vakuumapparatur nur gering ist. Zusätzlich aufgenommene elektronenmikroskopische Bilder zeigten, daß sich die von kompakten Beryllium her bekannte Tendenz

zur Bildung von grobkristalliner Struktur bis in die dünnsten von uns hergestellten Folien durchsetzt. Es gelang auf Grund der besonderen Kristallisationseigenschaften von Beryllium, Faser-Texturen durch Schrägstellung des Substrates zum Atomstrahl mittels Beugung und Abbildung mit Elektronenstrahlen nachzuweisen. Zusammenhaltende freitragende Beryllium-Folien mußten nach unseren zahlreichen Erfahrungen stets eine mittels des Interferometers nach Tolansky gemessene Mindestdicke von etwa 250 Å haben. Im Gegensatz zu den von N. Hast in der Literatur beschriebenen 20 Å dünnen und "völlig strukturlosen" Be-Folien gelang es uns bisher nicht, selbst unter Einsatz modernster Aufdampfmethoden, solch dünne Folien herzustellen.

Die lichtoptische Transmission $T = I/I_o$ wurde in Abhängigkeit von der Art der Herstellung, von der Dicke der Folie und von der Wellenlänge im sichtbaren und infraroten Bereich gemessen. Brechungsindex und Extinktionskoeffizient liessen sich aus diesen Werten nach den von Wolter angegebenen Formeln berechnen. Es ergab sich ein physikalisch und technisch interessantes Durchlässigkeitsmaximum bei $\lambda = 1,1\ \mu m$, welches dem kürzlich von Rösch gefundenen diskreten Energieverlust von 1 eV bei Durchgang von Elektronen durch eine Berylliumfolie entspricht.

Parallel zu den lichtoptischen Messungen wurde der elektrische Widerstand in Abhängigkeit von der Foliendicke gemessen. In Übereinstimmung mit elektronenmikroskopischen Bildern zeigt sich bei dünnen Folien eine starke Zunahme des Widerstandes infolge des nur über schmale Brücken zusammenhängenden Materials.

Die Streuabsorption von Be-Folien für 60 keV Elektronen wurde in Abhängigkeit von der Dicke und der Objektiv-Apertur gemessen und der elektronenmikroskopische Kontrast nach der Formel $K = \log I_o/I = c(\alpha, U_o, Z) \cdot \varrho \cdot D$ berechnet.

Der Röntgen-Absorptionskoeffizient $\mu = 2 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-1}$ für $\lambda = 44,8$ Å wurde mittels eines Vakuum-Röntgenspektrographen von Jarrell Ash bestimmt. Da die Absorption von etwa 2000 Å dicken Berylliumfolien im sichtbaren groß und im Röntgengebiet noch klein ist, eignen sich diese Folien als Filter für die Photographie der Sonne im Röntgenlicht.

Freitragende Be-Folien lassen sich als Registrierfolien für Elektronenmikroschreiber verwenden, wie an hergestellten Mikrogittern mit Gitterkonstanten von 1000 Å und darunter gezeigt wird.

Herrn Professor Dr. G. Möllenstedt danke ich herzlich für die Anregung und wohlwollende Förderung dieser Arbeit. Herrn Professor Dr. M. Auwärter danke ich für die Durchsicht des Manuskripts.

Der Fraunhofer Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung gebührt mein Dank für die finanzielle Unterstützung dieser Arbeit.

Literaturverzeichnis

(1) V. E. Cosslett
Beryllium Films As Object Supports In The Electron Microscopy Of Biological Specimens
Biochimica et Biophysica Acta 2 (1948) 239/245

(2) N. Hast
Production of Extremely Thin Metal Films By Evaporation On To Liquid Surfaces
Nature 162 (1948) 892/893

(3) M. Völker
Energieverteilung und Ausbeute von Sekundärelektronen aus dünnen Folien
Dissertation TU Berlin, 1959

(4) C. Jönsson, H. Hoffmann, G. Möllenstedt
Messungen des mittleren inneren Potentials von Beryllium im Elektronen-Interferometer
Phys. kondens. Materie 3 (1965) 193/199

(5) R. W. Adam
Untersuchungen zur Epitaxie dünner Goldaufdampfschichten auf Alkalihalogeniden
Dissertation Universität Hamburg, 1968

(6) A. J. Martin, J. E. Bunce, P. D. Tilbury
A Study Of The Electrical Conductivity Of Beryllium And The Effect Of Purity
J. of the Less Common Metals 4 (1962) 191/198

(7) K. Krebs, H. Nelkowski, R. Winkler
Der Zusammenhang zwischen elektrischem Widerstand und optischen Größen bei Silberaufdampfschichten
Z. Phys. 144 (1956) 509/520

(8) C. H. Cartwright
Notes On The Evaporation Of Ag, Be, Cr And Si
Rev. Sci. Instr. 3 (1932) 298

(9) H. J. Goldschmidt, W. M. Ham
The Tungsten Rich End Of The Tungsten-Beryllium System
J. of the Less Common Metals 10 (1966) 57/65

(10) F. Aldinger
Berylliumlegierungen: Aufbau, Eigenschaften und Anwendungen
Vortrag z. Diskussionstagung Beryllium, Stuttgart, 14.Nov.1968
Deutsches Atomforum u. Deutsche Ges. f. Metallkunde

(11) E. Menzel
Kugelförmige Metallkristalle mit unberührter Oberfläche und ihr Verhalten
Metalloberfläche 15 (1961) 265/68

(12) G. Zinsmeister
Aktuelle Probleme der Herstellung von Dünnschichtschaltungen
Balzers Hochvakuumbericht Nr. 7, Dezember 1967

(13) K.M. Graff
Optische Dichte und Dicke von aufgedampften Kohleschichten
Optik 18 (1961) 120/129

(14) L. Holland
Vacuum Deposition Of Thin Films, § 5
Chapman a. Hall Ltd., 1956

(15) E. Bauer
Fiber Texture
1962 Transactions, Ninth National Vacuum Symposium,
American Vacuum Society, 35/44

(16) L. Reimer
Elektronenmikroskopische Untersuchungs- und Präparationsmethoden, § 6
2. Auflage, Springer 1967

(17) R. Heidenreich
Fundamentals Of Transmission Electron Microscopy, § VII
Interscience Publishers, 1964

(18) M. Keller
Ein Biprisma-Interferometer für Elektronenwellen und seine Anwendungen
Z. Phys. 164 (1961) 274

(19) A. Fukami, Y. Tani
Recent Advances in Replica Technique in Japan
Proc. Int'l Congress on Electron Microscopy, London 1954, 474

(20) H. Mayer
Physik dünner Schichten, Teil II, Seite 99
Wiss. Verl. Ges., Stuttgart 1950

(21) E. Zeitler, G. Bahr
Contributions to Quantitative Electron Microscopy
JAP 30 (1959) 940/944

(22) R. Riedmiller
Über die Struktur dünner Metallschichten
Z. Phys. 102 (1936) 408

(23) F. Lenz
Zur Streuung mittelschneller Elektronen in kleinste Winkel
Z. f. Naturforschung 9 a (1954) 185/204

(24) C.E. Hall
Scattering Phenomena in Electron Microscope Image Formation
JAP 22 (1951) 655/662

(25) K. Weber, C. v. Fragstein
Über die Durchlässigkeit von Trägerfolien für den Elektronenstrahl im Übermikroskop
Optik 11 (1954) 511/523

(26) L. Reimer
Zur Elektronenabsorption dünner Metallaufdampfschichten im Elektronenmikroskop
Z. angew. Phys. 9 (1957) 34/38

(27) R.A. Haefer
Die Richtungsverteilung bei der Mehrfachstreuung mittelschneller Elektronen in dünnen Kohlenstoffschichten
Optik 17 (1960) 213/227

(28) H. Wolter
Zur Meßbarkeit der optischen Konstanten und der optischen Dicke dünnster Metallschichten
Z. Phys. 147 (1957) 1/23

(29) H.M. O'Bryan
The Optical Constants Of Several Metals In Vacuum
JOSA 26 (1936) 122/127

(30) I.N. Shklyarevskii, R.G. Yarovaya
Optical Properties Of Beryllium In The Infrared Spectral Region
Optics and Spectroscopy 11 (1961) 355/357

(31) E. Rösch
Energieverluste schneller Elektronen an Be, Y, Gd, Yd und Lu
Dissertation Tübingen, 1969

(32) W.M. Burton
Optical Transmission Data For Thin Aluminum Films
U.K.A.E.A. Research Group, Culham Laboratory
Nr. Abington, Berks., August 1966 (C. 16 ED)

(33) R. Speidel
Elektronenoptischer Mikroschreiber mit magnetischer Strahlablenkung unter elektronenmikroskopischer Arbeitskontrolle
Optik 23 (1965/66) 125/144

(34) P. Holl
Ein Elektronen-Strahlerzeugungssystem hoher Stabilität für Spitzen - und Haarnadelkathoden
Optik 28 (1968/69) 76/78

(35) G. Möllenstedt, H. Pollak, H. Seiler
Umwandlung von Beryllium in Be_2C und BeO durch Elektronenbestrahlung in Anwesenheit von Kohlenwasserstoff-Polymerisaten
Z. Phys. 182 (1965) 445/450

Lebenslauf

Am 21. Juni 1927 wurde ich, Heinz Köhler, als Sohn des Backofenbaumeisters Wilhelm Köhler und seiner Ehefrau Berta, geb. Wowra, in Erfurt geboren.

Nach dem bis 1941 erfolgten Besuch der Volksschule in Erfurt habe ich eine Schlosserlehre absolviert und im April 1944 die Gesellenprüfung bestanden. Während der Lehrzeit habe ich zusätzlich die Meisterschule des Deutschen Handwerks besucht.

Meine Einberufung zum Arbeitsdienst erfolgte im Mai 1944. Im Juli 1944 wurde ich zur Wehrmacht einberufen. Während der Kampfhandlungen in Luxemburg wurde ich verwundet und geriet in amerikanische Kriegsgefangenschaft.

Im Februar 1946 kehrte ich nach Erfurt zurück, wo ich zunächst mit der Enttrümmerung meines Elternhauses beschäftigt war. Danach wurde ich Praktikant im Stahlbau, wobei ich gleichzeitig an der Volkshochschule Erfurt die Mittlere Reife erwarb. Im Januar 1947 wurde ich in die Vorstudienschule Erfurt aufgenommen. Dort habe ich im September 1947 die Reifeprüfung abgelegt.

Vom Wintersemester 1947 an habe ich an der Friedrich-Schiller-Universität Jena Physik studiert. Während meines Studiums habe ich verschiedene Tätigkeiten als Werkstudent, als Lehrer und als Hilfsassistent ausgeübt. Meine Diplom-Arbeit habe ich im Zentralinstitut für Erdbebenforschung über anharmonische Schwingungsvorgänge bei langperiodischen Vertikalseismometern durchgeführt. Das Physik-Diplomexamen habe ich im Mai 1953 in Jena bestanden.

Meine erste hauptamtliche Tätigkeit als Physiker war auf dem Gebiet der angewandten Elektronenmikroskopie. Im Jahre 1955 wandte ich mich nach Berlin, wo ich eine Aufgabe in angewandter Elektronenoptik fand. Nebenamtlich war ich an der Ingenieurschule Gauß als Dozent tätig.

Im September 1956 bin ich einem Angebot zu einer Tätigkeit in den USA gefolgt. Dort habe ich bis Ende 1965 verschiedene Arbeiten auf den Gebieten Angewandte Physik, Festkörperphysik und Elektronenmikroskopie durchgeführt. Auch habe ich nebenamtlich als Dozent in Physik gearbeitet. Weiterhin habe ich von 1959 bis 1962 in der Graduate School der Syracuse University und von 1963 bis 1965 als Mitglied des Stanford Honors Cooperative Program an der Stanford University Kurs-Vorlesungen in Physik, Mathematik, Elektrizitätslehre und Materialwissenschaften gehört.

Im Jahre 1965 kehrte ich nach Deutschland zurück. Nach kurzer Industrietätigkeit erhielt ich von Professor Dr. G. Möllenstedt die Möglichkeit, unter seiner Anleitung im Institut für Angewandte Physik der Universität Tübingen an der Einrichtung eines Beryllium-Laboratoriums mitzuwirken und eine Dissertationsarbeit durchzuführen. Meine Arbeit über die Struktur von Beryllium-Aufdampfschichten wurde im Februar 1969 beendet.

Ich bin seit 1950 mit Herta Juliane Steinbrecher verheiratet und habe drei Kinder.

Meine akademischen Lehrer in Tübingen waren die Herren Professoren: Dr. M. Auwärter, Dr. H. Dachs, Dr. F. Lenz und Dr. G. Möllenstedt.

Druck: Reproanstalt Walter Betz